

極微細 CPP-MR 素子の作製とスピントランスファー効果に関する研究

著者	磯上 慎二
号	52
学位授与番号	3872
URL	http://hdl.handle.net/10097/37588

氏 名	いそがみ しんじ		
授 与 学 位	機 上 慎 二		
学位授与年月日	平成19年9月12日		
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項		
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電子工学専攻		
学 位 論 文 題 目	極微細 CPP-MR 素子の作製とスピントランスファー効果に関する研究		
指 導 教 員	東北大学教授 高橋 研		
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 高橋 研	東北大学教授 佐橋政司	
	東北大学教授 山口正洋	東北大学准教授 角田匡清	

論文内容要旨

ハードディスク装置 (HDD) の面記録密度を 1 Tbit/inch^2 以上にまで高めるためには, 再生ヘッド素子である電流垂直通電型磁気抵抗効果 (CPP-MR) 薄膜素子の膜面内寸法を 30 nm 以下まで微細化する必要がある. この微細化による電流密度の増大は, 伝導電子のスピントランスファー効果を顕在化し, 磁化ベクトルがトルクを受けることで, 再生出力の不安定化ならびに GHz 帯における磁気雑音 (マグノイズ) を増大させ, 新たな問題となることが理論的に指摘されている. スピンの歳差運動角は磁区構造によって決まる. 従って CPP-MR 薄膜素子のフリー層が複雑な多磁区構造をとるときには, 歳差運動角の分散は増大すると予想される. このとき発現するマグノイズスペクトルは, 複数のピークが観測されたり, 広周波帯域わたってブロードなノイズが観測されたりする. 現行の再生ヘッドで問題となるのは, 1 GHz 以下の低周波域に発生するノイズであるが, 前述のようにノイズピークが変化すると, 低周波ノイズに重畳する可能性がある. この問題解決のためには, 磁区構造を単磁区化することでマグノイズピークの高周波化が必要となる. そこで本研究では, この問題解決手段を実験的に明らかにする目的で, 新たに考案した極微細加工プロセスを用いて, 30 nm サイズの CPP-MR 薄膜素子を作製し, スピントランスファー効果による電流誘起磁化反転の挙動から, 通電時の素子の磁区状態ならびにマグノイズの素子サイズ依存性を検討した.

第2章では, 高出力・低抵抗 CPP-MR 薄膜の強磁性層材料の設計指針に関して検討した. これまで様々な手法により, CPP-MR 薄膜素子の高出力化が達成された. 代表的なものとして Fe-Co 合金薄膜へ Cu を強制固溶させる方法が挙げられる. これによる高出力のメカニズムは Fe-Co 合金薄膜中の Cu がスピン分極することで, スピン依存不純物散乱が増大することであると言われていた. これは強磁性層中にて, 非磁性材料である Cu のダウンスピン側の $3d$ 軌道にホールが現れることにより, スピンに依存した抵抗率に非対称性が生ずることを意味する. しかしながら, 高出力化とスピン分極との相関が定量

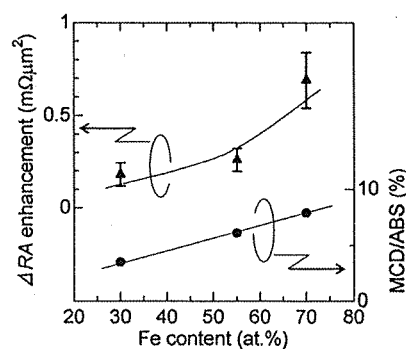


Fig.1 ΔRA の増加量とスピン分極の Fe 組成依存性.

的に理解されていなかった。そこで本研究では、磁気円二色性分光法を用いて Fe-Co 合金薄膜中の添加不純物 Cu のスピンの分極と、CPP-MR 素子の出力との間の相関について詳しい測定を行った。Fig.1 には Fe-Co 合金組成に対する ΔRA の増分とスピンの分極とをプロットした実験結果を示す。この結果より、Fe₇₀Co₃₀ において最大値が得られること、ならびにスピンの分極と ΔRA との間には強い相関関係があることを見出した。これは Cu 添加による出力の増大がスピン依存不純物散乱によるものであることを示唆する重要な知見である。次に Cu の吸収スペクトルから Fe-Co 層中の結晶構造を検討したところ、Fe₃₀Co₇₀ 層中の Cu だけ他の組成と異なるスペクトルが得られた。同様の積層膜を用いて結晶構造解析を行ったところ、Cu 添加後の Fe₃₀Co₇₀ 層のみ fcc 化していることが判った。以上の検討より、Fe₃₀Co₇₀ 層中の Cu のみ fcc 構造となっていることを見出した。さらに、高出力化をもたらす添加不純物元素の要件を解明するために、あらゆる遷移金属を Fe-Co 合金薄膜中へ添加し、同様の検討を行った。すると d 電子数が 6 以上である元素に限り、スピンの分極の大きさと ΔRA との間には前述のような相関があることを見出した。一方で d 電子が 6 以下である元素の場合は、 ΔRA は減少することを見出した。これらの結果を鑑みると更なる高出力化のために必要な要件は、高スピンの分極を示すことに加え、d 電子数が 6 以上必要であることを明らかにした。

第 3 章では、新たに開発した電子線アシスト CVD ハードマスクを用いた極微細加工プロセスに関して検討を行った。サブミクロンサイズまでの微細加工には、これまでレジストマスク法がよく用いられてきた。しかしながら所望のサイズに比べて大きくなる傾向、そして形成後のレジストピラーが大気中の水分を吸収することによって変形する傾向が強いため、100 nm より微細なレジストピラーの形成は困難であった。従って本研究では、Fig.2 で示すような 30 nm 程度の極微細ピラー形成が可能である電子線アシスト CVD ハードマスク法を新たに考案した。

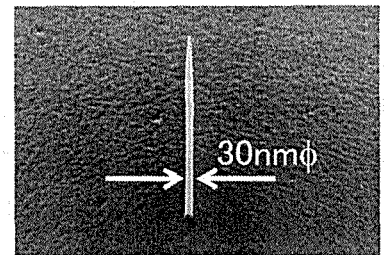


Fig.2 EB-CVD によって形成された W ピラー。

この方法で形成された W ハードマスクには、積層膜へのダメージが少ないこと、密着性が極めて高いこと、形状の再現性がよいこと、形成が簡便かつ必要とする設備が安価であることなど、多くの利点を有する。そればかりではなく実用化を目指した検討を通して、ピラー形成の特徴として他に例を見ない利点を明らかとした。具体的には W(CO)₆ ガスを充満させた鏡筒内で、CPP-MR 薄膜上に集束電子線を照射することにより、30 nm 程度の幅の W ピラーが制御性良く形成できることを見出した。W ピラーの電子線照射時間依存性に関して検討を行ったところ、ピラーの幅をほぼ一定に維持しながら、高さだけ時間に対して線形に増大させることが可能であった。また、電子線照射位置を走査することによって楕円形の W ピラーの形成を可能とし、フリー層体積が極微小であるにもかかわらず熱安定性に優れた CPP-MR 薄膜素子の作製を可能とした。更にこのピラーをミリング用ハードマスクとすると同時に素子のコンタクト電極として用いることで、30 nm サイズの極微細素子の形成を可能とした。極微細加工プロセスでの問題点に関して、2 段ミリング法、エッチバック反応性イオンエッチング法を適用することで、CPP-MR 素子の寄生抵抗の低減に成功した。以上の検討を通して作製された最小の CPP-MR 素子サイズは直径 23 nm であり、孤立パターンとして世界最小の素子での磁気抵抗効果の観測に成功してい

る。

第4章では、これまでの検討により得られた高出力かつ極微細な CPP-MR 薄膜素子における、スピントランスファー効果に関して検討を行った。具体的には CPP-MR 薄膜素子のフリー層の磁化の反転過程と磁区構造との安定性に関して議論している。CPP-MR 薄膜素子のサイズを変化させ、それぞれに対して電流誘起磁化反転過程におけるフリー層の磁化状態を、磁場による磁化反転過程と比較検討した。170×310 nm² および 45×50 nm² サイズの CPP-MR 薄膜素子における実験結果を Fig.3 および Fig.4 に示す。(a) および (b) にはそれぞれ、磁場掃引および電流掃引による微分抵抗値の変化をプロットしている。Fig.3 (170×310 nm²) においては、磁場掃引と電流掃引による磁気抵抗変化率を比較すると一致しないことが判った。また磁化配列が平行および反平行から測定を開始したところ、いずれの場合においても完全な磁化反転は起きず、中間抵抗状態が出現することを新たに見出した。一方 Fig.4 (45×50 nm²) では、ほぼ同等の磁気抵抗変化率が得られていることが判る。また初期の磁化配列の状態によらず、いずれの場合も完全な磁化反転が観測された。これらの考察のためにマイクロマグネティクスシミュレーション法を用い、磁区構造について検討した。計算にはスピントルク項を含めた LLG 方程式を、3次元メッシュ状に区切ったそれぞれのセルに対して適用することによって行った。磁化ベクトルの出力は、パルス電流印加後のオフパルス時における瞬時値である。Fig.5 (a, b) にはそれ

ぞれ、サブミクロンサイズ（直径 200 nm）と極微細サイズ（直径 30 nm）の磁化ベクトルマップ図を示す。この結果より、極微細サイズのフリー層において還流磁区構造はとり得ず、単磁区状態となることが判る。更に、印加電流値を増大させたところ単磁区状態をしめる磁化ベクトル分布にほとんど変化がないことが確かめられた。以上の実験結果と計算とを併せて考察すると、素子寸法をサブミクロンサイズから 40 nm にまで微細化すると、電流磁界による還流磁区の形成が抑制され、単磁区状態が安定化すると考えることができる。尚、これまでの極微細領域における磁区構造の検討については主に計算によって行われてきたが、本研究では初めてその結果を実験的に実証した。

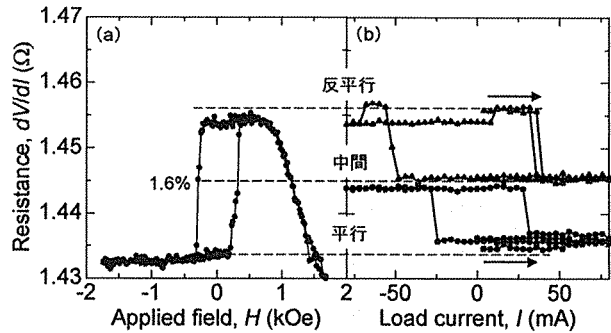


Fig.3 170×310 nm² CPP-MR 薄膜素子における (a) 磁場掃引, (b) 電流掃引による磁気抵抗変化。

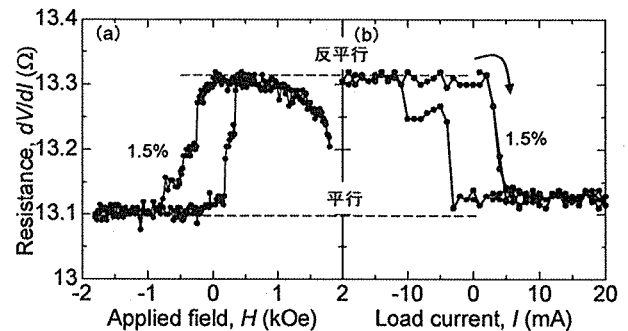


Fig.4 45×50 nm² CPP-MR 薄膜素子における (a) 磁場掃引, (b) 電流掃引による磁気抵抗変化。

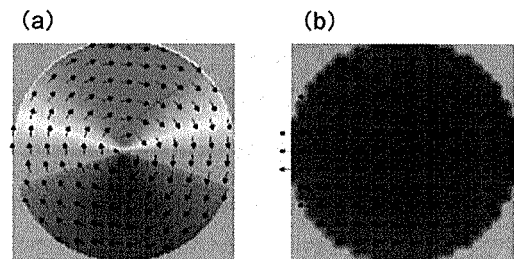


Fig.5 (a) 直径 200 nm, (b) 直径 30 nm の CPP-MR 薄膜素子における磁化反転後のベクトルマップ図。

第5章では、CPP-MR 薄膜素子のマグノイズに及ぼす素子サイズの効果について検討した。CPP-MR 薄膜素子のフリー層の磁区構造は、素子サイズの微細化により単磁区安定化することは第4章にて明らかにしたとおりである。また単磁区安定なフリー層から発現するマグノイズは単一ピークかつ高周波化が期待できると理論的に指摘されているため、再生ヘッド応用の観点から重要である。しかしながら極微細 CPP-MR 薄膜素子に対して実験的に実証した例は報告されていない。そこで本研究では、第3章にて確立された極微細加工プロセスを用いて $30 \times 45 \text{ nm}^2$ サイズに作製された、CPP-MR 薄膜素子におけるマグノイズの特性をサブミクロンサイズ ($130 \times 230 \text{ nm}^2$) のそれと比較検討した。Fig.6(a, b)はそれぞれサブミクロンサイズ、極微細サイズ CPP-MR 薄膜素子におけるマグノイズスペクトルのバイアス電流依存性の一例を示す。サブミクロンサイズの素子

においてはフリー層の磁気共鳴ピーク周波数が 4 GHz 近傍であったのに対して、 $30 \times 45 \text{ nm}^2$ サイズの極微細素子においては、有効異方性磁界の増大によって、より高周波の 6.3 GHz となった。

さらにバイアス電流値の増大に対して、極微細素子では共鳴ピークの低周波数側へのシフトが認められないことを見出した。これはフリー層磁化の単磁区安定化による効果である。以上のことから、HDD の再生ヘッドで問題となる 1 GHz 以下の領域でのマグノイズは、30 nm サイズに極微細化された CPP-MR 素子においても、サイズ効果によって抑制されることを示した。これは、極微細 CPP-MR 素子のヘッド素子応用における有用な知見である。

以上要するに本論文は、これまでに報告例のない 30 nm サイズの CPP-MR 素子の形成ならびに、それを用いた磁気抵抗効果の確認とノイズの計測に成功し、超高密度 HDD 用極微細再生ヘッド素子における出力とマグノイズの素子サイズ効果を実験的に検証したものである。その中で 30 nm サイズに及ぶ再生ヘッド素子の極微細化で問題視していた再生出力の不安定性やマグノイズの顕在化について具体的に検討した。まず再生出力の不安定化の原因である磁区の形成に関しては、極微細領域におけるフリー層は単磁区安定となる事、一方マグノイズに関しては依然として発現するものの、共鳴周波数が高周波側へシフトする事を実証し、再生ヘッド応用における問題解決の可能性を示した。

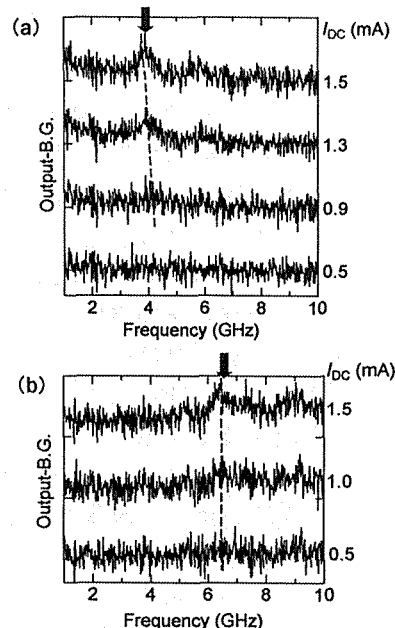


Fig.6 (a) サブミクロンサイズ ($130 \times 230 \text{ nm}^2$) および (b) 極微細サイズ ($30 \times 45 \text{ nm}^2$) CPP-MR 薄膜素子におけるマグノイズのバイアス電流依存性。

論文審査結果の要旨

ハードディスク装置(HDD)の面記録密度を 1Tbit/inch²以上にまで高めるためには、再生ヘッド素子である垂直通電型磁気抵抗効果(CPP-MR)薄膜素子の膜面寸法を 30nm 以下まで微細化する必要がある。この微細化による電流密度の増大は、伝導電子のスピントランスファー効果を顕在化し、磁化ベクトルがトルクを受けることで、再生出力の不安定化ならびに GHz 帯における磁気雑音を増大させ、新たな問題となることが理論的に指摘されている。本研究では、この問題を実験的に明らかにする目的で、新たに考案した極微細加工プロセスを用いて、30 nm サイズの CPP-MR 薄膜素子を作製し、スピントランスファー効果による電流誘起磁化反転の挙動から、通電時の素子の磁区状態ならびに磁気雑音の素子サイズ依存性を検討した。本論文はその研究成果についてまとめたもので、全文 6 章よりなる。

第 1 章は序論である。

第 2 章では、高出力・低抵抗 CPP-MR 薄膜の強磁性層材料の設計指針に関して述べている。磁気円二色性分光法を用いて評価した Fe-Co 合金薄膜中の添加不純物 Cu のスピン分極と、CPP-MR 素子の出力との間に明確な相関があることを見出した。これは、Cu 添加による出力の増大がスピン依存不純物散乱によるものであることを示唆する重要な知見である。さらに、高出力化をもたらす添加不純物元素としては、Fe-Co 合金薄膜中で高スピン分極を示すことに加え、d 電子数が 6 以上必要であることを明らかにした。

第 3 章では、電子線アシスト CVD ハードマスクを用いた極微細加工プロセスの開発に関して記述している。W(CO)₆ ガスを充満させた鏡筒内で、CPP-MR 薄膜上に集束電子線を照射することにより、30 nm 程度の幅の W ピラーが制御性良く形成できることを見出した。このピラーをミリング用ハードマスクとすると同時に素子のコンタクト電極として用いることで、30 nm サイズの極微細素子の形成を可能とした。さらに 2 段ミリング法、エッチバック反応性イオンエッチング法を適用することで、CPP-MR 素子の寄生抵抗の低減に成功した。以上の検討を通して作製された最小の CPP-MR 素子サイズは直径 23 nm であり、孤立パターンとして世界最小の素子での磁気抵抗効果の観測に成功している。

第 4 章では、スピントランスファー効果によるフリー層磁化の反転過程と磁区構造について議論している。電流誘起磁化反転過程における磁化状態を、磁場による磁化反転過程と比較検討した。また、その考察のためにマイクロマグネティクスシミュレーション法を用い、磁区構造について検討した。その結果、素子寸法をサブミクロンサイズから 40 nm にまで微細化すると、電流磁界による還流磁区の形成が抑制され、単磁区状態が安定化することを明らかとした。

第 5 章では、CPP-MR 素子の磁気雑音に及ぼす素子サイズの効果について検討している。120×230 nm² サイズの素子においては、フリー層の磁気共鳴ピーク周波数が 4 GHz 近傍であったのに対して、30×45 nm² サイズの極微細素子においては、有効異方性磁界の増大によって、より高周波の 6.3 GHz となった。さらにバイアス電流値の増大に対して、極微細素子では共鳴ピークの低周波数側へのシフトが認められないことを見出した。これはフリー層磁化の単磁区安定化による効果である。以上のことから、HDD の再生ヘッドで問題となる 1 GHz 以下の領域での磁気雑音は、30 nm サイズに極微細化された CPP-MR 素子においても、サイズ効果によって抑制されることを示した。これは、極微細 CPP-MR 素子のヘッド素子応用における有用な知見である。

第 6 章は結論である。

以上要するに本論文は、これまでに報告例のない 30 nm サイズの CPP-MR 素子の形成ならびに、それを用いた磁気抵抗効果の確認とノイズの計測に成功し、超高密度 HDD 用極微細再生ヘッド素子における出力と磁気雑音の素子サイズ効果を実験的に検証したものであり、磁気工学ならびに電子工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。